

薄板坯连铸连轧 微合金化技术

Microalloying Technology on
Thin Slab Casting and Direct Rolling Process

毛新平 等著



冶金工业出版社
<http://www.cnmip.com.cn>

要 容 内

薄板坯连铸连轧微合金化技术

毛新平 等著

图书在版编目(CIP)数据

薄板坯连铸连轧微合金化技术 / 毛新平等著. — 北京 :

冶金工业出版社, 2002.1

ISBN 7-5024-4404-1

I. ①薄… II. 毛… III. ①薄板—冶金—技术—研究

②冶金—薄板—冶金—技术—研究 IV. TP377.7.7.432.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第202033号

出 版 人 黄 健

社 址 北京北三环中路66号 邮编 100089

电 话 (010)64791320 电 信 邮 政 邮 政 局 100089

发 行 所 冶金工业出版社发行部 电话 (010)64791320

印 刷 所 北京冶金工业出版社印刷厂

印 数 2187-5024-4404-1

定 价 10.00元 (含增值税)

2002年1月第1版, 2002年1月第1次印刷

160mm×230mm 32开 1.32印张 1-3000册

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

8008

内 容 提 要

本书回顾了薄板坯连铸连轧技术和微合金化技术的发展历程,分析了薄板坯连铸连轧技术的特点及其关键技术,论述了钛、钒、铌、硼等微合金化技术的特点和理论基础,重点阐述了钛、钒、铌、硼等微合金化元素在薄板坯连铸连轧流程中的析出规律以及基于薄板坯连铸连轧流程钛、钒、铌、硼等微合金钢的组织演变规律、强韧化机理,提出了薄板坯连铸连轧流程各种微合金化技术关键问题的解决方案,总结了高强及超高强耐候钢、超细晶高强汽车结构钢、管线及石油套管用钢等高性能钢材的生产技术及产品应用技术。

本书可供冶金与材料领域的钢铁生产企业、工程设计院、研究院以及高等院校科研人员、工程设计人员、生产人员、教学人员、管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

薄板坯连铸连轧微合金化技术/毛新平等著. —北京:
冶金工业出版社, 2008. 1

ISBN 978-7-5024-4434-1

I. 板… II. 毛… III. ①薄板—板坯—连续铸钢
②连续轧制: 薄板轧制 IV. TF777. 7 TG335. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 202032 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 尚海霞 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4434-1

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2008 年 1 月第 1 版, 2008 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 25.25 印张; 490 千字; 389 页; 1-3000 册

58.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

序

在可以预见的未来时期，钢铁仍然是难以替代的“必选材料”，而且是可循环材料。钢铁不仅是非常重要的结构材料，也是以年产千万吨计的重要功能材料。

1856年亨利·贝塞麦发明底吹转炉以后，国际钢铁工业步入真正的工业化进程，迄今已有150年左右的历史。在这150年左右的历史进程中，特别是第二次世界大战结束以后，世界钢铁工业得到了迅猛的发展，其工艺技术、装备水平、制造流程结构、产品质量及其品种、规格、产量水平都取得了重大的进步。从工艺技术、装备角度上看，超大型高炉、氧气转炉、连续铸钢、大型连轧机等发明与发展，特别是全连铸钢厂的出现及其全球性推行，使得钢厂的结构发生了深刻的变化。在这种技术进步思想的推动下，1989年世界上第一条薄板坯连铸连轧作业线在美国建成并投入生产，其影响不言而喻。1999年，我国第一条薄板坯连铸连轧作业线在广州珠江钢厂顺利投产，相继有邯钢、包头钢厂的薄板坯连铸连轧作业线成功投产、达产。至2006年，我国已有13条薄板坯连铸连轧作业线，年产能力约3000万吨，已成为生产热轧宽带钢的重要组成部分。

薄板坯连铸连轧生产流程的特点是：重视生产工艺流程的连续性/准连续性和紧凑—协调性，最大限度地减少不必要的加工工序；力求生产过程中最小的能源消耗，特别是连铸以后生产工序的能源消耗；最大限度地保持薄板坯和轧件的温度均匀性，使产品具有均匀的微观组织和力学性能、高水平的厚度精度和优良的板形。

薄板坯连铸连轧作业线成功投产以后，各国学者特别是中国学者非常重视相关的技术开发和产品开发。中国工程院产业工程科技委员会内专门设立了“薄板坯连铸连轧技术交流与开发协会”，并选举了理事会。自2003年以来，每年举办一次全国性的年会，交流生产技术经验，交流学术观点。其中，涌现出了一批年轻才俊。

毛新平博士是我国较早地从事薄板坯连铸连轧流程的设计、建设、生产和产品开发的年轻才俊之一。他曾在设计院工作多年，从事工程设计和建设工作，继而转入钢铁企业担任总工程师。他勤奋扎实地深入生产实践，进行

工艺研究和产品开发,取得了令人瞩目的成绩。毛新平博士原来是学习金属压力加工专业的,后又转攻冶金学,获得工学博士学位,以其较为宽阔的知识基础和较为丰富的实践经验,对薄板坯连铸连轧作业线的产品开发进行了比较系统、深入的研究,并经过提炼、总结写成《薄板坯连铸连轧微合金化技术》一书,既具有学术意义,更具有对生产实践的指导价值。

本书的特点是:从薄板坯连铸连轧生产工艺流程中存在的许多不同于传统工艺流程的冶金—材料学特点出发,例如薄板坯特有的过程热履历,更快的凝固和冷却速度以及这些特点对凝固、冷却、形变、相变过程中微合金化元素行为的影响,进而研究、开发在薄板坯连铸连轧工艺流程条件下微合金化技术和微合金化产品。本书在概要地介绍了薄板坯连铸连轧技术的同时,介绍了微合金钢的定义、微合金化技术原理,进而分别讨论了在薄板坯连铸连轧条件下添加钛、钒、铌、硼诸元素的微合金化技术及其相应的产品开发、产品性能,内容的系统性、实用性较强。值得强调指出的是,本书涉及的知识 and 成果大都是来自生产实践的,是经过了生产过程的实践验证的。当然,某些理论上的认识或工艺技术的完善,可能还有待进一步深化。总之,可以相信本书对于钢铁生产企业特别是薄板坯连铸连轧生产企业、冶金与材料专业的高等院校、钢铁工程设计和研究院的相关专业人士,具有相当的参考价值,而且可以说是一本较为系统的专业参考书。

殷瑞钰

2007年10月2日于北京

前 言

薄板坯连铸连轧技术是近十几年来世界钢铁工业取得的重要技术进步之一，是继氧气转炉炼钢、连续铸钢之后，又一带来钢铁工业技术革命的新技术。目前，薄板坯连铸连轧技术已得到广泛的推广应用。至2006年底，全球已建薄板坯连铸连轧生产线54条，年生产能力达9080万t。其中我国有13条，年生产能力约3000万t，约占我国热轧宽带钢生产能力的30%，我国已成为全球拥有薄板坯连铸连轧生产线最多、产能最大的国家。

微合金化技术是提高钢材综合性能的有效技术途径，随着薄板坯连铸连轧技术的推广应用，人们开始研究基于薄板坯连铸连轧流程的微合金化技术的相关问题，并取得了许多成果。近年来，广州珠江钢铁有限责任公司与广钢集团CSP应用技术研究所、北京科技大学和钢铁研究总院合作，系统研究了薄板坯连铸连轧工艺条件下微合金元素各类析出物的析出规律和各种微合金钢的强化机理，发现了不同于传统流程的若干特殊规律，研制出高强耐候钢、超细晶高强汽车结构钢、石油管线及套管用钢等系列高性能钢板。基于上述研究成果，“薄板坯连铸连轧微合金化技术研究及低成本高性能微合金钢的开发”项目获2007年度国家科技进步奖二等奖，“薄板坯连铸连轧微合金化技术及其应用研究”项目获2006年度冶金科学技术奖一等奖。

本书回顾了薄板坯连铸连轧技术和微合金化技术的发展历程，分析了薄板坯连铸连轧技术的特点及其关键技术，阐述了薄板坯连铸连轧流程钛、钒、铌、硼等微合金元素的析出规律、相关微合金钢的组织演变规律、强韧化机理、生产技术及产品应用技术。本书共6章。第1章概述了微合金化技术的基础理论，概括了微合金化技术的发展，特别是基于薄板坯连铸连轧流程微合金化技术发展的情况；第2章回顾了薄板坯连铸连轧技术的发展历程、分析了几种薄板坯连铸连轧技术的特点、薄板坯连铸连轧的连铸、衔接和热连轧等工序的关键技术、半无头轧制和铁素体轧制技术等新技术；第3~6章分别论述了钛、钒、铌、硼等微合金化技术的特点和理论基础，重点阐述了钛、钒、铌、硼等微合金化元素在薄板坯连铸连轧流程中的析出规律以及基于薄板坯连铸连轧流程钛、钒、铌、硼等微合金钢的组织演变规律、强韧化机理，提出了薄板坯连铸连轧流程各种微合金化技术关键问题的解决方案，总结了

高强及超高强耐候钢、超细晶高强汽车结构钢、管线及石油套管用钢等高性能钢材的生产技术及产品应用技术。

本书旨在系统总结在薄板坯连铸连轧微合金化技术的基础理论、生产技术和产品应用技术等方面的研究成果,丰富薄板坯连铸连轧技术和微合金化技术,拓展薄板坯连铸连轧技术的产品范围,提高薄板坯连铸连轧技术的竞争力。

本书由毛新平等著。其中,第1章的1.1~1.3节由毛新平撰写,1.4节由毛新平和朱达炎撰写;第2章由毛新平撰写;第3章由毛新平和高吉祥撰写;第4章由毛新平和李春艳撰写;第5章由毛新平和陈麒麟撰写;第6章由毛新平、谢利群和霍向东撰写。康永林教授、黄志坚教授审阅了全部书稿,孙新军博士审阅了第3~4章,霍向东博士审阅了第5章,陈麒麟硕士审阅了第6章。

感谢殷瑞钰院士、干勇院士、李正邦院士、张寿荣院士、王国栋院士、翁宇庆教授、李文秀教授、仲增墉教授、苏天森教授、田乃媛教授、傅杰教授、柳得棹教授、张永权教授、杨才福教授等对本课题研究工作的悉心指导。特别是殷瑞钰院士在钛微合金化技术研究方面给予了高屋建瓴的指导,使研究工作取得突破性进展,并在百忙之中为本书作序。

感谢康永林教授、刘清友教授、孙新军博士、霍向东博士、周建博士、苏亮博士、阳军硕士、李烈军博士、柴毅忠博士、林振源硕士、高吉祥博士、庄汉洲高工、李春艳硕士、陈麒麟硕士、许传棻高工、谢利群硕士、陈学文硕士、苏东硕士、李轲新硕士、钟志永工程师、张金星工程师、刘义军工程师、沈训良工程师、谢劲松工程师、袁红霞工程师等在课题研究过程中所做的大量、卓有成效的工作,课题组全体成员的精诚合作使研究工作取得了可喜成绩。感谢贺东风博士、刘阳春博士、吴华杰博士、江供养硕士对研究工作的支持和帮助。感谢广州珠江钢铁责任有限公司的领导和工程技术人员对课题研究工作的大力支持。

感谢康永林教授、黄志坚教授、孙新军博士、霍向东博士、陈麒麟硕士在百忙之中审阅了书稿并提出了许多宝贵意见。感谢王建珂工程师在本书编写过程中所做的大量工作。

由于本书所涉及的是全新的领域,加之作者水平所限,书中不足之处,恳请读者指正。

毛新平

2007年10月8日

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
微合金化钢	25.00
石油天然气管道工程技术及微合金化钢	85.00
钒钛材料	35.00
汽车用铌微合金化钢板	85.00
如何用铌改善钢的性能——含铌钢生产技术	39.00
现代铌钢长条材	45.00
铌·高温应用	49.00
现代含铌不锈钢	45.00
多元渗硼技术及其应用	22.00
矿物直接合金化冶炼合金钢——理论与实践	26.00
薄板坯连铸连轧钢的组织性能控制	79.00
薄板坯连铸连轧工艺技术实践	56.00
薄板坯连铸连轧(第2版)	45.00
薄板坯连铸装备及生产技术	48.00
现代电炉—薄板坯连铸连轧	98.00
连铸坯质量(第2版)	24.50
连续铸钢	30.00
连续铸钢原理与工艺	30.00
新编连续铸钢工艺及设备(第2版)	40.00
连铸及炉外精炼自动化技术	52.00
汉英英汉连续铸钢词典	65.00
板带冷轧机板形控制与机型选择	59.00
二十辊轧机及高精度冷轧钢带生产	69.00
高速轧机线材生产	75.00
中国热轧宽带钢轧机及生产技术	75.00
热连轧带钢生产	35.00
钢管连轧理论	35.00
小型型钢连轧生产工艺与设备	75.00
转炉炼钢功能性辅助材料	40.00
炼钢氧枪技术	58.00
中国电炉流程与工程技术文集	60.00
CONSTEEL®国际学术研讨会论文集	50.00
炉外精炼及铁水预处理实用技术手册	146.00
冶金流程工程学	65.00
洁净钢——洁净钢生产工艺技术	65.00
超细晶钢——钢的组织细化理论与控制技术	188.00
钢铁冶金及材料制备新技术	28.00
钢铁生产工艺装备新技术	39.00
冶金设备液压润滑实用技术	68.00
高速钢轧辊制造技术	35.00
轧机轧辊及轴承使用维修技术	49.00

目 录

1 概论	1
1.1 微合金钢的定义	1
1.2 微合金化技术原理	1
1.2.1 微合金元素的特性及其在钢中的存在形式	2
1.2.2 微合金元素析出物的长大及其尺寸变化规律	3
1.2.3 微合金元素析出物对奥氏体晶粒粗化行为的影响	3
1.2.4 微合金元素析出物对奥氏体再结晶行为的影响	5
1.2.5 微合金元素析出物对 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变行为的影响	6
1.2.6 微合金元素析出物的沉淀强化	7
1.2.7 奥氏体调节原理	8
1.3 微合金化技术发展概况	10
1.4 薄板坯连铸连轧微合金化技术发展现状	12
1.4.1 薄板坯连铸连轧钒微合金化技术发展现状	12
1.4.2 薄板坯连铸连轧铌微合金化技术发展现状	15
1.4.3 薄板坯连铸连轧钛微合金化技术发展现状	16
1.4.4 薄板坯连铸连轧硼微合金化技术发展现状	17
1.4.5 结语	18
参考文献	19
2 薄板坯连铸连轧技术	23
2.1 概述	23
2.1.1 薄板坯连铸连轧技术的提出	23
2.1.2 薄板坯连铸连轧技术的特点	24
2.1.3 薄板坯连铸连轧技术的发展历程	26
2.1.4 薄板坯连铸连轧技术的发展趋势	28
2.2 几种薄板坯连铸连轧技术	30
2.2.1 CSP 技术	30
2.2.2 ISP 技术	33
2.2.3 FTSR 技术	36
2.2.4 CONROLL 技术	38

2.2.5 QSP 技术	39
2.2.6 几种薄板坯连铸连轧技术的比较	40
2.3 薄板坯连铸连轧连铸技术	41
2.3.1 结晶器	42
2.3.2 浸入式水口	43
2.3.3 保护渣	44
2.3.4 液心压下	44
2.3.5 结晶器振动	45
2.3.6 电磁制动	46
2.3.7 二次冷却系统	47
2.3.8 主要自动控制及检测功能	47
2.4 薄板坯连铸连轧衔接技术	48
2.4.1 衔接段的作用	48
2.4.2 几种衔接技术	49
2.5 薄板坯连铸连轧热轧技术	50
2.5.1 特殊的速度制度	50
2.5.2 薄规格产品轧制技术	50
2.5.3 板形、凸度、平直度控制及自由轧制技术	51
2.5.4 混合轧制技术	51
2.5.5 大压下轧制技术	51
2.5.6 高效除鳞技术	52
2.5.7 宽度控制技术	52
2.6 薄板坯连铸连轧新技术	53
2.6.1 半无头轧制技术	53
2.6.2 铁素体轧制技术	59
2.6.3 结语	65
参考文献	65
3 薄板坯连铸连轧钛微合金化技术	67
3.1 概述	67
3.1.1 钛微合金化技术发展概况	67
3.1.2 钛微合金化技术的特点	68
3.2 钛微合金化理论基础	70
3.2.1 钛的化合物形成倾向	70
3.2.2 含钛析出物的沉淀析出规律	70
3.2.3 含钛析出物沉淀析出的相关因素	71

3.2.4 钛对钢组织性能的作用	74
3.3 薄板坯连铸连轧钛微合金化技术的研究与开发	78
3.3.1 薄板坯连铸连轧含钛析出物的析出规律	79
3.3.2 薄板坯连铸连轧钛微合金钢的组织演变规律	101
3.3.3 薄板坯连铸连轧钛微合金钢的强韧化机理	104
3.3.4 薄板坯连铸连轧钛微合金钢的铸坯元素偏析及其影响因素	110
3.3.5 相关因素对钛微合金钢性能的作用	121
3.3.6 薄板坯连铸连轧钛微合金钢的生产技术	127
3.4 薄板坯连铸连轧钛微合金化技术的应用	135
3.4.1 焊接高强度钢方面的应用	135
3.4.2 微合金冲压钢方面的应用	140
3.4.3 高强耐腐蚀钢方面的应用	146
参考文献	162
4 薄板坯连铸连轧钒微合金化技术	167
4.1 概述	167
4.1.1 钒微合金化技术发展与应用概况	167
4.1.2 钒微合金化技术的特点	168
4.2 钒微合金化理论基础	168
4.2.1 钒的化合物形成倾向	168
4.2.2 钒在钢中的固溶规律	169
4.2.3 碳氮化钒析出的热力学驱动力	171
4.2.4 钒微合金钢中析出相的化学组成	172
4.2.5 碳氮化钒的析出规律	174
4.2.6 钒及其碳氮化物的作用	185
4.2.7 钒微合金钢的焊接性能	195
4.3 薄板坯连铸连轧钒微合金化技术的研究与开发	198
4.3.1 薄板坯连铸连轧钒的析出规律	198
4.3.2 薄板坯连铸连轧钒微合金钢的组织演变规律	212
4.3.3 薄板坯连铸连轧钒微合金钢的组织超细化机理	217
4.3.4 薄板坯连铸连轧钒微合金钢的强韧化机理	220
4.3.5 薄板坯连铸连轧钒微合金钢的生产技术	223
4.4 薄板坯连铸连轧钒微合金化技术的应用	232
4.4.1 高强度结构钢方面的应用	232
4.4.2 石油管线用钢方面的应用	241
参考文献	244

5 薄板坯连铸连轧铌微合金化技术	250
5.1 概述	250
5.1.1 铌微合金化技术发展概况	250
5.1.2 铌微合金化技术的特点	251
5.1.3 铌微合金化技术的应用	252
5.1.4 铌微合金化技术与薄板坯连铸连轧的适应性	253
5.2 铌微合金化理论基础	254
5.2.1 铌的化合物形成倾向	255
5.2.2 铌在钢中的固溶规律	256
5.2.3 碳氮化铌的析出动力学	258
5.2.4 碳氮化铌析出的位置和形貌	261
5.2.5 铌的细晶作用规律	262
5.2.6 铌的沉淀强化规律	270
5.2.7 铌微合金钢的焊接性能	271
5.3 薄板坯连铸连轧铌微合金化技术的研究与开发	273
5.3.1 薄板坯连铸连轧铌的析出规律	273
5.3.2 薄板坯连铸连轧铌微合金钢的组织演变规律	281
5.3.3 薄板坯连铸连轧铌微合金钢的无效铌问题	292
5.3.4 薄板坯连铸连轧铌微合金钢的混晶问题	294
5.3.5 薄板坯连铸连轧铌微合金钢的生产技术	300
5.4 薄板坯连铸连轧铌微合金化技术的应用	314
5.4.1 石油管线用钢方面的应用	314
5.4.2 汽车结构钢方面的应用	333
参考文献	344
6 薄板坯连铸连轧硼微合金化技术	350
6.1 概述	350
6.1.1 硼微合金化技术的特点	350
6.1.2 硼微合金化技术发展概况	351
6.1.3 硼微合金化技术与薄板坯连铸连轧的适应性	352
6.2 硼微合金化理论基础	353
6.2.1 硼的化合物形成倾向	353
6.2.2 硼在钢中的存在形式	353
6.2.3 硼在钢中的固溶规律	358
6.2.4 硼微合金钢的淬透性	359
6.2.5 硼对钢性能的影响	362

6.3 薄板坯连铸连轧硼微合金化技术的研究与开发	363
6.3.1 硼微合金钢中影响 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变的因素	364
6.3.2 薄板坯连铸连轧 BN 的析出规律	367
6.3.3 薄板坯连铸连轧硼微合金钢的组织粗化机理	370
6.3.4 薄板坯连铸连轧硼微合金化钢软化机理	377
6.3.5 薄板坯连铸连轧硼微合金化钢生产技术	378
6.4 薄板坯连铸连轧硼微合金化技术的应用	381
6.4.1 冷轧原料用钢的组织性能特点	381
6.4.2 薄板坯连铸连轧硼微合金钢的力学性能	382
6.4.3 薄板坯连铸连轧硼微合金钢时效性能分析	383
6.4.4 硼对冷轧工序及产品性能的影响	383
6.4.5 薄板坯连铸连轧硼微合金钢的成形性能	386
参考文献	386

1 概 论

微合金化技术是提高钢材综合性能的有效技术措施，基于传统流程的微合金化技术的研究有几十年的历史，已形成了较系统的理论体系，而薄板坯连铸连轧流程存在许多有别于传统流程的特点，这些特点对薄板坯连铸连轧流程微合金化元素的行为产生较大影响，使薄板坯连铸连轧工艺条件下的微合金化技术具有新的特征。

因此，探索微合金元素在薄板坯连铸连轧流程中的物理冶金特点，发挥薄板坯连铸连轧微合金化技术的优势开发各类高性能钢材，一方面将丰富和发展薄板坯连铸连轧技术和微合金化技术，另一方面也将拓展薄板坯连铸连轧技术产品范围，推动相关行业的发展，既具有较高的学术价值，也将具有较高的实用价值、良好的经济效益和社会效益。

1.1 微合金钢的定义

微合金钢的定义最早是瑞典人 Noren 于 1963 年提出的：“微合金钢的化学成分分类同于未合金化的结构钢，在很多情况下它是一种含锰合金钢或低合金钢，其中添加了少量合金元素……，这种元素对钢的一种或几种性能具有很强的或者是显著的影响，而其添加的量比钢中传统意义的合金元素含量小 1~2 个数量级^[1]。如铝处理钢就是一例，其中铝的作用无疑是微合金元素，这种元素的其他例子是钒、钛、铌和硼”。微合金钢的这种定义自此在世界范围广泛采用。

目前普遍采用的微合金钢的严格定义是：“微合金钢是在普通低碳钢或普通高强度低合金钢化学成分的基础上添加了微量合金元素（一般为强碳氮化物形成元素且所添加的量比钢中传统意义的合金元素的含量小 1~2 个数量级）而使其一种或多种使用性能产生明显有利变化的工程结构用钢”^[2]。

1.2 微合金化技术原理

微合金元素在钢中以固溶于铁基和形成微合金碳氮化物的形式存在，基于微合金元素析出物对奥氏体晶粒粗化行为的影响、固溶微合金元素及其析出物对奥氏体再结晶行为的影响和固溶微合金元素及其析出物对 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变行为的影响，通过采取控制轧制技术，达到调节奥氏体、获得细小铁素体组织的目的，同时通过微合金元素析出物的沉淀强化进一步改善性能。

1.2.1 微合金元素的特性及其在钢中的存在形式

铌、钒、钛均为难熔金属，均具有很强的形成氮化物和碳化物的能力。铌、钒、钛与铁原子的半径差很小，在一定的条件下既可以溶解又可以以碳氮化物的形式析出。因此，微合金元素在钢中以固溶于铁基和形成微合金碳氮化物的形式存在。微合金固溶量和形成微合金碳氮化物的量可通过微合金碳氮化物在铁基中的固溶度积公式计算。微合金元素的碳化物和氮化物在奥氏体和铁素体中的固溶度通常以微合金元素和碳、氮的质量分数的固溶度积来表示，具体表达固溶度积的关系式如下：

$$\lg K_s = \lg([M][X]) = A - B/T \quad (1-1)$$

式中， K_s 为平衡常数； $[M]$ 为某微合金元素处于固溶状态的质量分数； $[X]$ 为碳或氮处于固溶状态的质量分数； A 、 B 为常数； T 为绝对温度。

固溶度积公式可通过热力学计算方法推导或通过物理化学相分析方法测试。不同的研究者得出的固溶度积公式差异较大，主要原因是各种方法所假定的条件不同及其他元素对微合金元素的活度有较大影响。钛、钒、铌、铝的碳化物和氮化物在奥氏体中的固溶度积如图 1-1 所示^[3]。可见，各种微合金元素的碳化物和氮化物的固溶度积差别很大，其中 TiN 的最小而 VC 的最大，TiC、NbC 和 VN 的固溶度积基本相同。微合金元素碳化物和氮化物固溶度积的差异性为微合金钢的合金化设计提供了依据。

钛的氮化物是在钢水凝固阶段形成的，实际上难以溶于奥氏体，因此能在钢

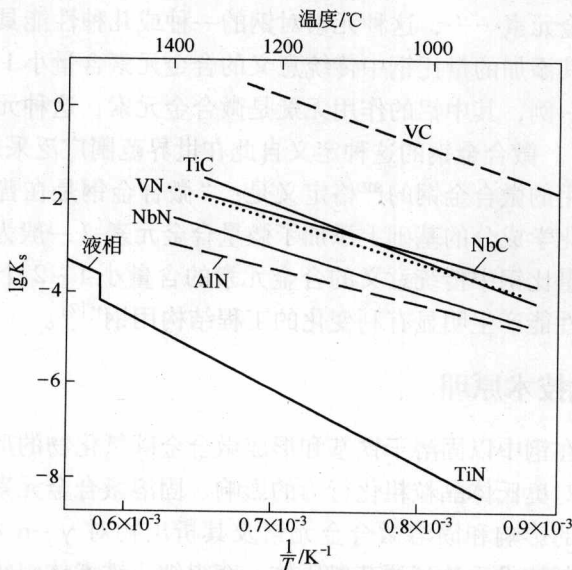


图 1-1 钛、钒、铌、铝的碳化物和氮化物在奥氏体中的固溶度积

的热加工加热过程和焊接时的焊缝中控制晶粒尺寸, 另外由于形成 TiN, 可以消除钢中自由氮, 对抗时效有一定的作用。在传统流程中, 钒的氮化物和碳化物在奥氏体内几乎完全溶解, 对控制奥氏体晶粒不起作用。钒的化合物仅在 γ/α 相变过程中或相变之后析出, 析出物非常细小, 有十分显著的沉淀强化效果。钛的碳化物和铌的氮化物、碳化物可在高温奥氏体区内溶解, 又能在低温奥氏体区内析出。

1.2.2 微合金元素析出物的长大及其尺寸变化规律

在一定的温度下保温一定的时间后, 第二相粒子的平均尺寸将随温度的升高和时间的延长而不断增大, 这一过程一般称为第二相的聚集长大, 或称为第二相的 Ostwald 熟化。由于其控制机制的不同, 其长大规律也不同。扩散条件控制下的基体内均匀分布的第二相粒子的平均尺寸 d 可由式 1-2 计算^[4]:

$$d_t^3 = d_0^3 + \frac{64D\sigma V_{MCN}^2 C_0}{9RTV_m C_p} t = d_0^3 + m^3 t \quad (1-2)$$

式中, d_t 和 d_0 分别为 t 时间后和初始时第二相粒子的平均尺寸; D 为控制性元素在基体中的扩散系数; σ 为第二相与基体之间的界面能; V_{MCN} 为第二相的摩尔体积; V_m 为基体的摩尔体积; C_0 和 C_p 分别为控制性元素在基体中和在第二相中的平衡原子浓度; R 为摩尔气体常数; T 为温度 (绝对温度)。

1.2.3 微合金元素析出物对奥氏体晶粒粗化行为的影响

1.2.3.1 晶粒粗化的驱动力

晶粒粗化发生在热变形后多晶体金属或合金中, 其驱动力主要是晶粒长大前后总的界面能差, 晶粒粗化是整个系统力求使总的界面自由能达到最小值的一个自发过程。热变形后的多晶体金属或合金处于非平衡状态, 晶界处的非平衡力使晶界向各自曲率中心运动, 以减小弯曲、降低界面自由能^[5]。在适宜的温度下随着时间的延续, 晶界运动使小的晶粒越来越小, 最终消失, 大的晶粒尺寸不断增加, 结果是晶粒粗化。单位晶界面积的驱动力为:

$$F = \Delta G / V_M \quad (1-3)$$

式中, ΔG 为由晶界迁移引起的自由能的降低量; V_M 为单位体积。式 1-3 适用于晶界运动引起自由能降低的情形。对于晶粒粗化过程, ΔG 由晶界弯曲提供, 细晶粒奥氏体粗化时的驱动力约为 $100\text{kJ}/\text{m}^2$ ^[6]。

根据晶粒粗化的原理, 如果没有外界的影响, 在加热过程中, 奥氏体晶粒将发生粗化, 随着加热温度的提高和加热时间的推移, 奥氏体晶粒将持续长大。但如果外界因素的影响, 晶粒粗化将受阻甚至停止。有两种阻碍晶粒粗化的机

制：质点钉扎和溶质拖曳。

1.2.3.2 质点钉扎阻碍晶粒粗化

若钢中存在细小的第二相质点，则可以通过对晶界的钉扎作用，阻止奥氏体晶粒长大。Gladman 详尽分析了解钉时能量的变化，得到当第二相为均匀分布的球形粒子时，晶界解钉的判据为^[7,8]：

$$D_0 = \frac{\pi d}{6f} \left(\frac{3}{2} - \frac{2}{Z} \right) \quad (1-4)$$

式中， D_0 为晶粒的平均等效直径； d 和 f 分别为析出第二相的平均直径和体积分数； $Z = D_M/D_0$ ，为晶粒尺寸不均匀性因子即最大晶粒的直径（ D_M ）与平均晶粒直径（ D_0 ）的比值。晶粒正常长大时， Z 值约为1.7，而反常晶粒长大时 Z 值可高达9。假设 $Z = 1.5$ ，由式1-4可得图1-2。

图1-2为质点的尺寸、体积分数与所能钉扎的最小晶粒尺寸的关系，一定尺寸的质点能钉扎住具有该线上方晶粒尺寸的晶粒。在实际的钢中，质点能够钉扎的最小晶粒尺寸位于图中下面的阴影区域，上面的阴影区域是能被大夹杂物固定的最小晶粒尺寸。由这两类不同的质点固定的晶粒尺寸差别很大，几乎有2个数量级。

可见，最适于阻止晶粒长大的质点是那些有最小尺寸和最大体积分数的质点，这就要求质点在奥氏体中溶解度低，并且自身长大也慢。

1.2.3.3 溶质拖曳阻碍晶粒粗化

通常所说的溶质拖曳效应，是指在晶界的扩散移动过程中，部分合金元素在晶界上偏聚，导致界面能下降、晶界迁移驱动力降低的现象。特别当固溶元素的电负性、原子尺寸和扩散速率与基体相差很大时，溶质拖曳作用就十分显著。图1-3给出了各种微合金化元素的溶质拖曳参数（Solute Retardation Parameters, SRP）^[9,10]。这些SRP值定量描述了在碳锰钢中各种元素0.01%固溶量对再结晶时间的延迟作用。可见，各种微合金元素中，固溶的铌具有强烈的溶质拖曳作用，而固溶钛和钒的溶质拖曳作用较小。

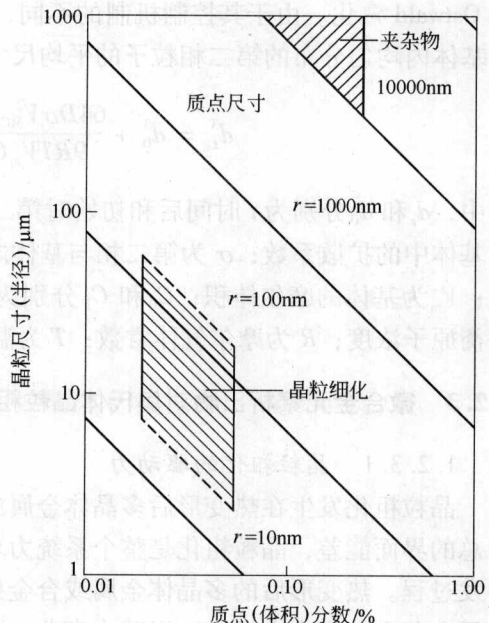


图 1-2 质点阻止晶粒长大的效果